

強磁場精密測定装置の試作

八木 壽郎*・立川 敏明**

Some Remarks about a New Apparatus measuring the High Power Electromagnetic Field

Hisao YAGI and Toshiaki TATUKAWA

(Received March 29, 1967)

A new apparatus, by which high power electromagnetic field can be measured using the principle of the nuclear magnetic resonance of Proton and Vanadium, has been designed and made. It is not expensive but is handy and has high accuracy. By using it the measurement of magnetic field with an accuracy, better than 1 part in 10^5 , at 2 kilogausses, can be done.

1 緒 言

近來超電導を利用した超強磁場装置をはじめ、その他低インピーダンス型コイル等の発展によって、今までは非常に得難かった高磁場が比較的容易に得られるようになった。同時にその強磁場を正確に測定することが急務となり、磁場測定装置もしだいに改良されている。しかしこれらの測定装置も機構が簡単で、取扱いが易く、安価で、しかも精度の高いものとなかなか得難い。この論文ではこれらの目的にいくぶんでもかなうような高磁場測定器を研究開発したので、それらについて報告する。

2 装置の理論的考察

一般に磁場を測定する場合には、従来三つの方法がある。すなわちガウスメーターのように発電機原理を利用したもの、半導体等のホール効果を利用したものおよび磁気共鳴現象を利用したものである。これらのうち磁気共鳴現象を利用したものは、極めて精度が高い。そこでわれわれも核磁気共鳴 (N. M. R.) を利用することにした。したがって以下に述べられる理論は本質的に磁気共鳴の理論である。

静磁場 H_z が Z 方向に核にかけられると、核スピン

は核スピン磁気能率と静磁場との磁氣的相互作用を通じて方向量子化される。核スピンを I とすると I の Z 方向の成分のとり得る値 m は

$$m = I, (I-1), \dots, 0, \dots, -(I-1), -I \quad \dots\dots\dots(1)$$

となる。ここで m の値の差 Δm が 1 の時の状態間のエネルギー差は

$$g\beta H_z$$

で与えられる。ここで g は g -因子と呼ばれ核固有の値で、 β は核磁子で $5.05038 \times 10^{-24} \text{ erg/gauss}$ の値を持つ。この時このエネルギー差に等しい光子 $h\nu$ を持った電磁波を核に与えると、核スピン磁気能率と電磁波の振動磁界との相互作用で誘導遷移が起こる。これが磁気共鳴現象であって、この時

$$h\nu = g\beta H_z \quad \dots\dots\dots(2)$$

が共鳴条件となる。ここで h はプランク定数で $6.6237 \times 10^{-27} \text{ erg. sec.}$ 、 ν は与えた振動電磁界の周波数である。但し実験的には核の磁気能率と電磁界の偏光との関係から振動磁界を静磁場に直角に加える必要がある。

(2)式からわかるように、磁場を測定するためには共鳴が起こった時の振動電磁界の周波数 ν を測定すればよい。現在では周波数測定は、それ程困難もなく非常に

精密に測定できる。また共鳴現象は非常に尖鋭に認められるので、高精度の測定が可能である。

ここでこの磁気共鳴現象を現象論的に考えると、磁気共鳴の測定は共鳴時の物質の複素磁化率の測定と考えられる。いま H_z に垂直な方向の全磁化の成分を M とし、複素磁化率を $\chi = \chi' - i\chi''$ とし振動磁界を $H = H_1 \cos 2\pi \nu t$ とすると

$$M = \chi H = (\chi' - i\chi'')H \quad \dots\dots(3)$$

なる関係がある。ここで χ' は複素磁化率 χ の実数部で、 χ'' は虚数部をあらわしている。(3)式の χ' 項は分散項を χ'' 項はエネルギー吸収項を与える。すなわち振動電磁界の一周周期あたりに物質に吸収されるエネルギーは、単位体積あたり

$$A = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} H \left(\frac{dM}{dt} \right) dt$$

$$= 2\omega\chi''H_1^2 (\text{erg} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}) \quad \dots\dots(4)$$

となる。ここで $\omega = 2\pi\nu$ で $H = H_1 \cos 2\pi \nu t$ で積分は時間積分である。このような χ の測定は試料にかかる振動電磁界用の高周波コイルを試料に巻きつけ、そのインダクタンスの変化を測定することによって得られる。いまコイル内に試料を入れた時と抜いた時のインダクタンスをそれぞれ L 、 L_0 とし試料の複素磁化率を χ とすると、次の関係が成立する

$$L = L_0(1 + 4\pi\eta\chi) \quad \dots\dots(5)$$

ここで、 η は充てん率と呼ばれ

$$\eta = \frac{\int_V \chi H^2 dV}{\int_V H^2 dV}$$

で定義され、 v および V は試料体積、コイル体積をあらわし、積分はそれぞれの体積で行なわれる。また $(1 + 4\pi\eta\chi)$ は透磁率である。ここで試料を入れた時のコイルのインピーダンス Z を求めると、コイルの抵抗を R_0 として

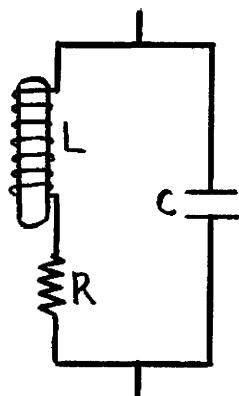


図1 RLC共振回路

$$Z = iL_0\omega(1 + 4\pi\eta\chi' - i4\pi\eta\chi'') + R_0$$

$$= iL_0\omega(1 + 4\pi\eta\chi') + R_0 + 4\pi\eta\chi''L_0\omega \quad \dots\dots(6)$$

で与えられる。一般にコイルは図1のようにRLC共振回路の一部として使用される場合が多い。その時共振回路の共振角周波を ω_0 とすれば、 $Q = L_0\omega_0/R_0$ としさらに $\omega - \omega_0 \ll 1$ とすれば $Q = L_0\omega/R_0$ で近似される。抵抗およびインダクタンスの試料をコイル内にそう入したことによる変化の割合は

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{L_0\omega}{R_0} \cdot 4\pi\eta\chi'' = 4\pi\eta\chi''Q \quad \dots\dots(7)$$

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{L_0\omega}{L_0\omega} 4\pi\eta\chi' = 4\pi\eta\chi' \quad \dots\dots(8)$$

となる。ここで ΔR 、 ΔL は抵抗およびインダクタンスの試料をコイル内にそう入したことによる変化分である。(7)式の ΔR は発信源からみれば消費エネルギーの増加としてあらわれる。またこのエネルギー増加分は(4)式の試料が吸収するエネルギーに等しい。(7)および(8)式から信号は χ' 、 χ'' が同時にそれぞれインダクタンス、抵抗の増加としてインピーダンスにあらわれるので、適当なブリッジ回路等を用いて、これを分離する必要がある。

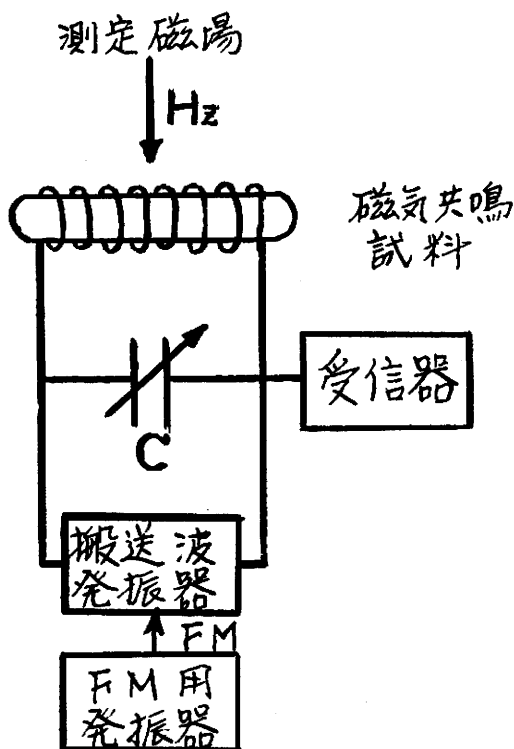


図2 核磁気共鳴法による磁場測定器の原理図

図2は上に述べた理論を応用した実際の磁場測定の原理的構造を示している。この図中でF.M.発振器は

標準発振器の発振角周波数 ω に周波数変調 (角周波数 p) をはこぶもので、その原理は次のごとくである。標準搬送波に角周波数 p で F.M. を行うとき、出力電圧波形 $e(t)$ は次のようになる。

$$e(t) = E_m \cos(\omega t + \alpha \sin pt) \quad \dots\dots\dots (9)$$

これをフーリエ展開すれば

$$\begin{aligned} e(t) = & +E_m J_0(\alpha) \cos(\omega t) && \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \text{搬送波} \\ & +E_m J_1(\alpha) \cos(\omega + p)t && \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \text{第1側帯波} \\ & -E_m J_1(\alpha) \cos(\omega - p)t && \\ & +E_m J_2(\alpha) \cos(\omega + 2p)t && \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \text{第2側帯波} \\ & +E_m J_2(\alpha) \cos(\omega - 2p)t && \\ & \dots\dots\dots && \\ & \dots\dots\dots && \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、 E_m : 搬送波の振幅

$J_n(\alpha)$: α を変数とする n 次のベッセル関数

α : 変調指数で $\alpha < 1$ とする

p : 変調角周波数

である。(10)式より、試料において共鳴する振動電磁界の周波数は搬送波の角周波数 ω と $\omega \pm np$ の周波数成分を持つものである。ここで n は $0, 1, 2, \dots$ である。

(2)式の共鳴条件式は

$$h \left(\nu \pm n \frac{p}{2\pi} \right) = g\beta H_z$$

となり、これを変形して

$$h\nu = g\beta \left(H_z \pm \frac{nph}{2\pi g\beta} \right) \quad \dots\dots\dots (11)$$

となる。したがって変調角周波数 p が正確にわかっている時は、標準共振振動電磁界の周波数 ν を測定するだけで、共振周波数 ν に対する磁場 H_z とそれから $\pm (nph)/(2\pi g\beta)$ だけ離れた所の磁場が同時に測定できる。

N.M.R., E.S.R. 等ではしばしば磁場を変化さず磁場掃引方式が行なわれているので、その時の磁場測定器は同時にある範囲の磁場を測定する必要がある。このような必要性を満足させるために、ここで述べた F.M. 法が行なわれる。

3 測定装置

N.M.R. を利用した磁場測定器の装置のうち最も重要な部分は発振器と検出器である。検出器には従来いろいろな方法が用いられたが、この実験で試作したものはパウンド型の発振器兼検出器に種々の改良を加えたもので、その詳細について述べる。

図3にこの実験で試作した発振器兼検出器の電子回路図を示す。またこの回路の回路定数を表1に示す。

まず発振部は 12AT7 双三極管のカソード結合型発振器と測定核試料に巻かれたコイルと可変コンデンサーの LC 共振回路から成っている。LC 共振回路の C は可変コンデンサーで、それを調節することによって

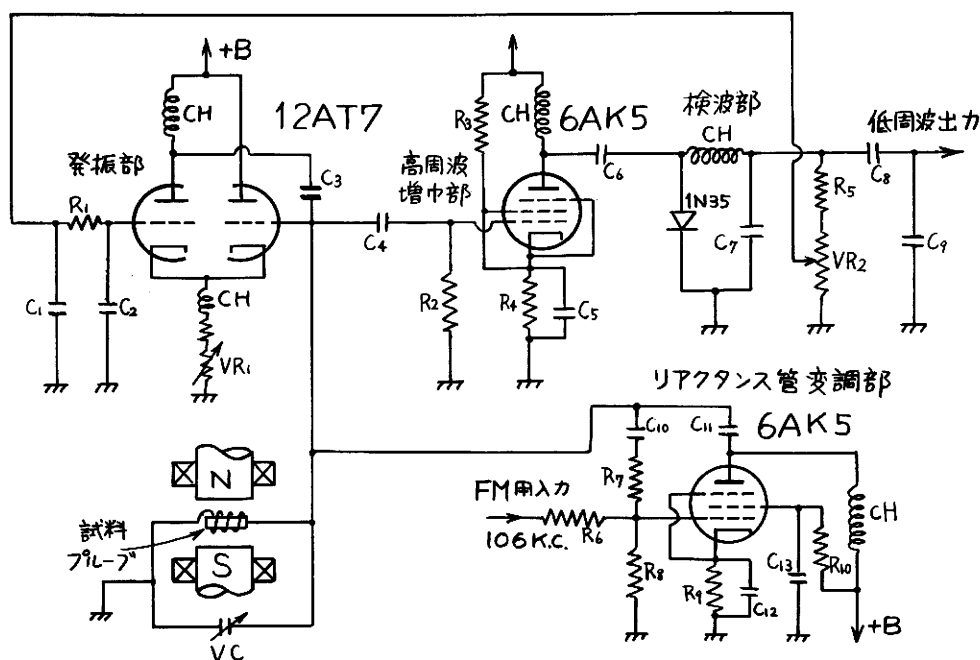


図3 発振器兼検出器

表1 電子回路定数

R_1	500	$K\Omega$	C_1	0.1	μF	VR_1	5	$K\Omega$
R_2	500	$K\Omega$	C_2	100	PF	VR_2	500	$K\Omega$
R_3	20	$K\Omega$	C_3	50	PF	VC	20	PF
R_4	50	Ω	C_4	50	PF	CH	4	mH
R_5	500	$K\Omega$	C_5	0.01	μF			
R_6	100	$K\Omega$	C_6	100	PF			
R_7	500	$K\Omega$	C_7	0.001	μF			
R_8	1	$M\Omega$	C_8	0.1	μF			
R_9	500	Ω	C_9	0.05	μF			
R_{10}	20	$K\Omega$	C_{10}	20	PF			
			C_{11}	20	PF			
			C_{12}	0.001	μF			
			C_{13}	0.01	μF			

10MC~35MCの間に同調させることができる。この発振回路の周波数は出力回路の検波部からのフィードバック作用によって、 10^{-5} まで安定していることを周波数計によって確認した。LC共振回路のうちコイル

はブルーブ中に取付けられて、測定磁場の中に置かれる。磁気共鳴を起こさせる試料を直径5mmのガラス管に封入し、この外側に直径0.2mmの銅線を12ターン程巻いてコイルを作り、これをブルーブに取付けるのである。このブルーブ部分の構造を図4に示す。

次の周波数変調回路は6AK5を用いたリアクタンス管変調方式である。このような変調方式では基準発振回路のLC共振回路を操作するため、発振の中心周波数が変動しやすい欠点を持っているが、回路の簡単化のためと先に述べたように周波数が十分安定していたので、今回はそれ程問題にはならなかった。他の回路は普通の高周波増幅回路とダイオード検波回路である。検波回路から取り出された出力の一部は発振器のグリッドに饋還される。これは振幅制御回路で、ここではLC共振回路のQ特性によって、振幅制御回路は周波数制御の働きをもする。したがってこれは一種のA.F.C.の作用をする。またこの回路は磁気共鳴時には、複素磁化率 χ の実数部分 χ' による信号に鈍感で

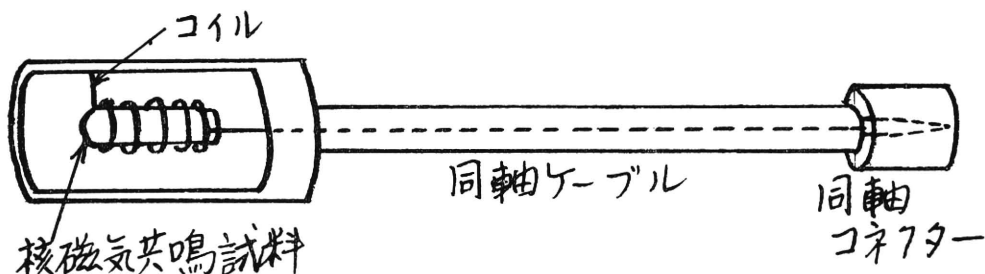


図4 ブルーブ

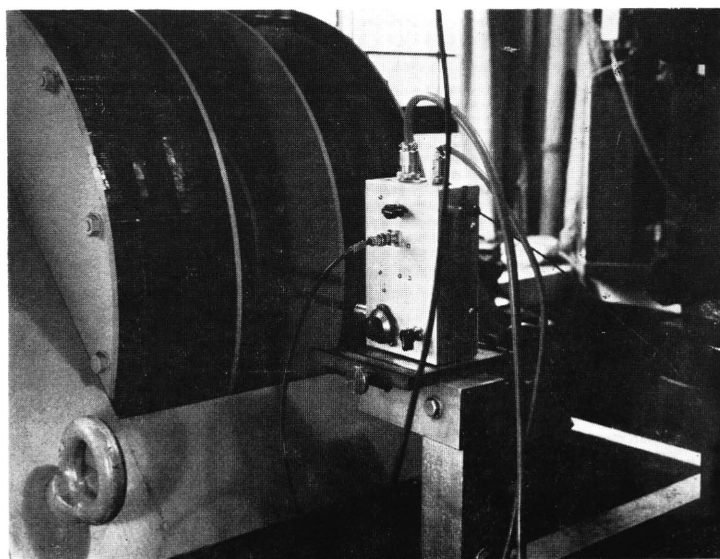


図5 発振器兼検出器の概観

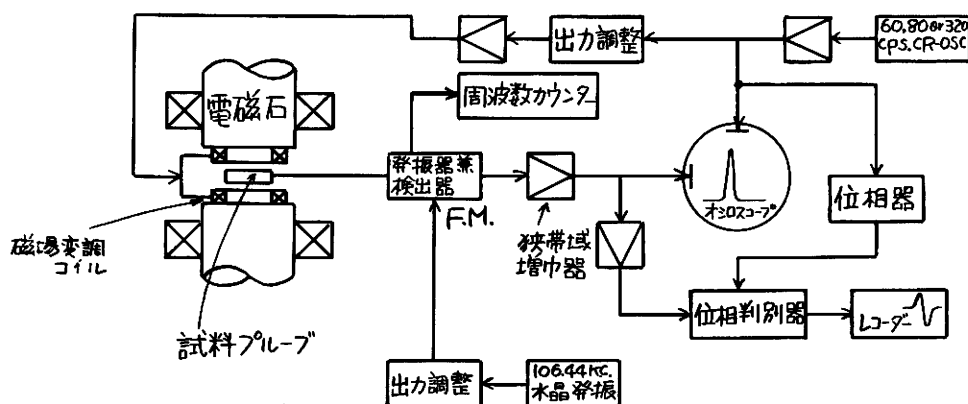


図6 NMRブロックダイアグラム

磁化率の虚数部 χ'' による信号に敏感であるように働く¹⁾。

図3の回路で N.M.R. 信号はまず LC 共振回路の共振周波数と(2)式の磁気共鳴周波数とが一致した時、前節で述べたように、発振器からみた負荷の増加として現われる。この負荷の増加は発振電圧の変化となりそれが検波器を通してあらわれる。この発振器兼検出器の概観を図5に示す。電子回路の部分は直方体のシャーシーに納められ、同軸ケーブル或は銅管でプローブ部分と接続される。またプローブは前後に微調移動ができるように台車がついている。

このようにして検出器から取り出された信号はこの後増幅され、記録される。しかし E.S.R, N.M.R 等に使用される電磁石では感度をよくするため、直流静磁場をある周波数で磁場変調する場合が多い²⁾。その場合信号は磁場変調周波数で検出器から取り出されることになるので、その後それは狭帯域増幅器で増幅され、それを位相判別器(phase-sensitive-detector)と呼ばれる回路で検波して、信号波形の一階微分波形として、取り出される³⁾。これらの装置については市販されているものとはほぼ同じ回路を使用したの、ここでは述べない。

最後にこの実験で使用した測定器の全体のブロックダイアグラムを図6に示す。

4 測定結果と検討

3節で述べられた測定器を用いて実際に行なわれた磁場測定の結果について述べる。まず磁場は現在著者の研究室で使用されている日本電子製の JM-360 型で約 20 K ガウス程度まで出せるものである。したがって測定された磁場は 20 K ガウス程度までである。

この測定器の振動磁界の周波数の安定度は 9 桁まで読みとり可能な周波数カウンターで測定したところ、 5×10^{-6} の確度で安定していた。また F.M. 用周波数は 106.44 KC で、温度調節器のついた水晶発振器を用い確度 5×10^{-6} である。核磁気共鳴の試料はプロトン H^1 とバナジウム V^{51} である。それらの g 値は⁴⁾

H^1 ; 5.5810

V^{51} ; 1.4700

である。またこれらの試料はスピンスピン相互作用をさせて、motional narrowing による共鳴巾の減少を起こさすように⁴⁾ 液体でうすめたものを使用した。

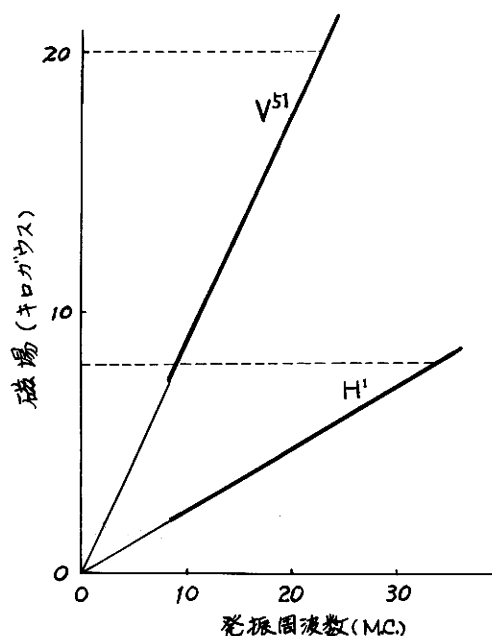


図7 測定磁場対周波数

それぞれの共鳴幅の半値幅は

H^1 ; 2.4 ガウス

V^{51} ; 2.7 ガウス

である。この共鳴幅の減少の操作は共鳴を尖鋭化するために重要である。この測定で使用した試料は図7に示されているように約8000ガウス以下はプロトンを使用し、それ以上はバナジウムを使った。図中で太い黒線の部分が測定範囲である。このようにすれば発振器の周波数は10MC~35MCの範囲だけで、20Kガウスまでの磁場の測定が可能である。

これらのことから磁場は確度 1×10^{-5} で測定することができた。但しここで使用された磁場の均一性はポールピース中心から ± 1 cmで、1ガウス以下であるので、測定された磁場は試料部分が1 cm以内の時だけこの確度が保障されることになる。

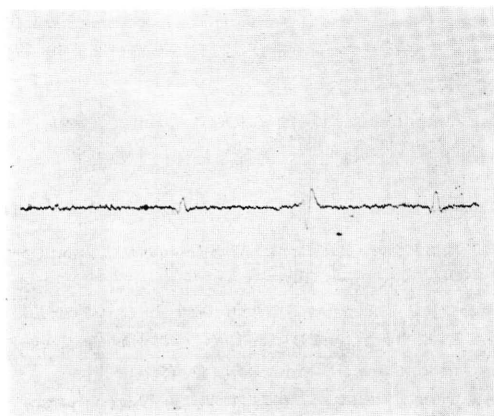


図8 V^{51} の共鳴吸収, 中心磁場 12,035ガウスで中心周波数 13.489 MC. 共鳴点間隔は95ガウスである

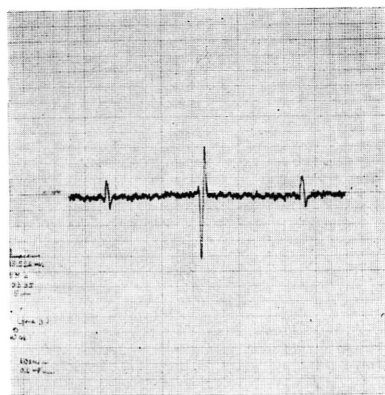


図9 V^{51} の共鳴吸収, 中心磁場 13,852ガウスで中心周波数 15.526 MC. 共鳴点間隔は95ガウスである

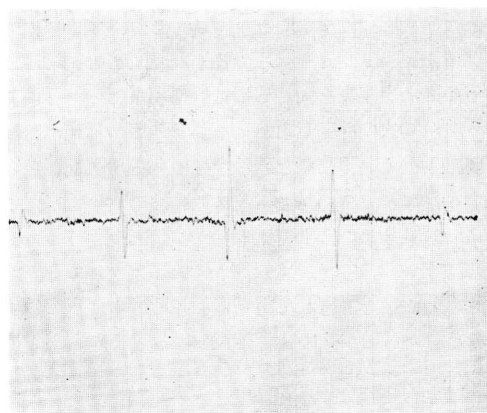


図10 V^{51} の共鳴吸収, 中心磁場16,056ガウスで中心周波数 17.996 MC. 共鳴点間隔は95ガウスである

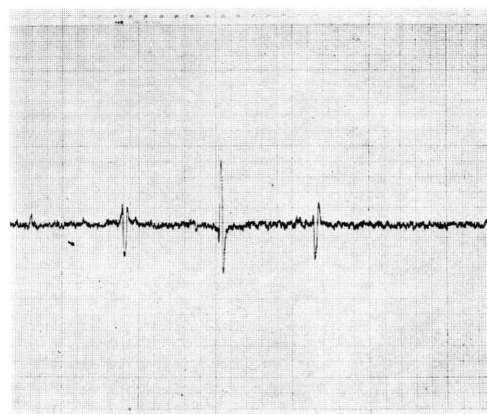


図11 V^{51} の共鳴吸収, 中心磁場18,252ガウスで中心周波数 20.457 MC. 共鳴点間隔は95ガウスである

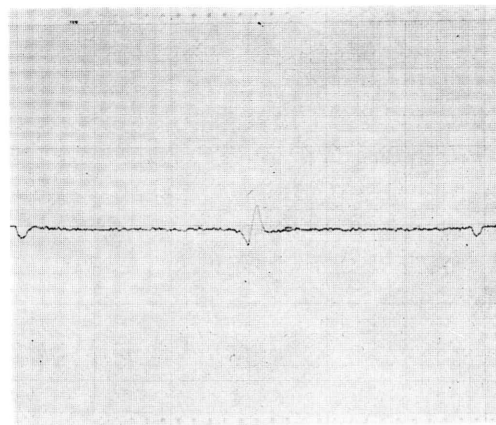


図12 V^{51} 共鳴吸収, 中心磁場20,533ガウスで中心周波数 23.014 MC. 共鳴点間隔は95ガウスである

図8から図12は1.2K ガウスから2.0K ガウスの測定結果をX-Yレコーダーで描かせたものである。これらの図は周波数を固定して磁場掃引を行ったものでカーブは(1)式の共鳴点を与える。この図の横軸は磁場目盛を与えている。すなわち中央の共振搬送周波数の両側に次々と第1側帯波、第2側帯波の共鳴点が出てくるのが見える。これら共鳴点の間隔はプロトン H^1 で25.0ガウス、バナジウム V^{51} で94.9ガウスである。これらのことを考慮して磁場掃引範囲内の任意の磁場をグラフから 1×10^{-4} の確度で読みとることが可能である。

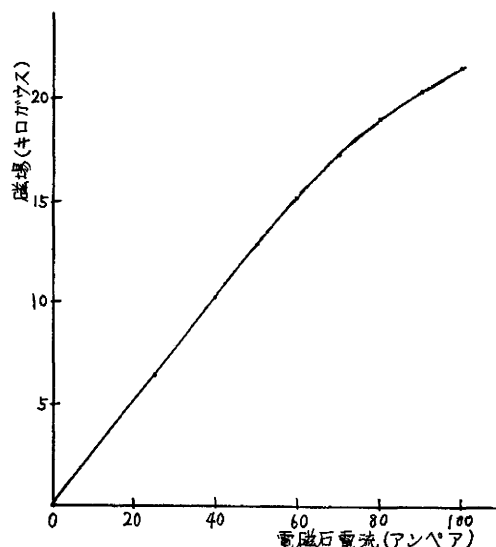


図13 電磁石の電流特性

ここでF.M. 用周波数を変えると、搬送波周波数共鳴点と側帯波周波数共鳴点の間隔を変えることになるから、この周波数を変えることによってグラフから 1×10^{-5} の確度で読みとることも可能であろう。

図13は著者の所で使用している電磁石の電流-磁場特性をこの測定器で測定してプロットしたものである。

最後にこれらの測定結果を検討すると、核において(1)式の定数は 1×10^{-5} の程度の確度しか持っていないので、 1×10^{-5} の確度の磁場の測定は磁気共鳴法の限界であろうと思われる。

5 ま と め

この実験は著者の研究室で行なわれている物質の誘電性および磁性研究の基礎実験として行なわれたものである。この実験を行なうにあたり、終始実験助手を担当してくれた応物理学科学生の中嶋公明、銅子賢治両君に御礼の言葉を述べる。

この研究は昭和41年度福井大学工学部父兄後援会研究補助金による研究として行なわれたものである。

文 献

- 1) A. Andrew ; Nuclear Magnetic Resonance (Cambridge University Press, 1955).
- 2 & 3) G. Feher ; Bell System Tech. J., 36, 449 (1957).
- 4) R. E. Sheriff and D. Williams ; Nuclear Gyromagnetic Ratios III, Phys. Rev., 82, 651 (1951).
- 5) 富田和之, 伊藤順吉 ; 磁気共鳴吸収, 物質の電氣的性質第7編第1章 (共立出版 1958)

(昭和42年3月29日受理)